Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 1, Spring. 2019, p. 39-52

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۵۲-۳۹

تاثیر بیوچار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) تحت شرایط تنش خشکی

فاطمه عباس‌پور[1]، حمیدرضا اصغری[2*]، پرویز رضوانی مقدم[3]، حمید عباسدخت[4]، جواد شباهنگ[5]، عادل بیگ بابایی[6]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸

چکیده

به‌منظور بررسی تاثیر بیوچار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا گردید. تیمارها شامل آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح ۱۰۰درصد، ۷۰ و ۴۰درصد نیاز آبی و کرت‌های فرعی شامل فاکتور بیوچار در سه سطح شامل بدون بیوچار، ۱۰ تن در هکتار بیوچار و ۲۰ تن در هکتار بیوچار و کود شیمیایی در دو سطح شامل بدون مصرف کود و مصرف کود بود. نتایج نشان داد که مصرف۲۰ تن در هکتار بیوچار بیشترین تاثیر را بر درصد نیتروژن خاک، میزان پتاسیم، درصد مواد آلی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشت ولی اثر بیوچار بر میزان فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار نبود. نتایج مرتبط با گیاه سیاه‌دانه نشان داد که با وجود معنی‌دار نبودن اثر ساده بیوچار بر صفات گیاه، اثر متقابل آن با کود شیمیایی و نیاز آبی معنی‌دار شد. بیشترین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به‌همراه مصرف کود شیمیایی (I_2F_2) و ۱۰ تن در هکتار بیوچار به‌همراه مصرف کود شیمیایی (B_2F_2) مشاهده شد. اثرات متقابل آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش در سیاه‌دانه داشت و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی به‌همراه ۱۰ تن در هکتار بیوچار و کودشیمیایی ($I_2B_2F_2$) بود. به طور کلی، استفاده از بیوچار در مناطق خشک و نیمه‌خشک علاوه بر بهبود خصوصیات خاک، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش داده و با تاثیر بهینه بر عملکرد، میزان آب مصرفی در سیاه‌دانه را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کربن زیست‌توده میکروبی، کود شیمیایی، عملکرد دانه، مواد آلی خاک

مقدمه

افزایش جمعیت همراه با تغییرات شدید عوامل زیست‌محیطی و اقلیمی، بی‌ثباتی‌های اقتصادی، فقر، گرسنگی و به‌ویژه عدم وجود امنیت غذایی را به‌همراه دارد. امنیت غذایی، دسترسی همه مردم به غذای کافی در هر زمان برای یک زندگی سالم است که مستلزم افزایش عملکرد محصولات و پایداری آن، افزایش بازده منابع آب و خاک، کاهش ضایعات تولیدی و اصلاح الگوی تغذیه می‌باشد (Schouten, 2010). برای دستیابی به سیستم‌های زراعی پایدار، سلامت خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گیاهان عناصر غذایی خود را از موادآلی یا مواد معدنی موجود در خاک‌ها به‌دست می‌آورند. کشاورزی مدرن از طریق برداشت‌های مکرر محصول باعث کاهش موادآلی خاک می‌شود. استفاده از کودهای شیمیایی که با صنعتی شدن کشاورزی رواج یافت، عملکرد گیاهان زراعی را به دو یا سه برابر افزایش داد ولی به‌دلیل کاهش کیفیت خاک، استفاده از کودهای شیمیایی برای حصول همان مقدار عملکرد به‌تدریج در طی زمان افزایش یافت. از طرف دیگر، مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه نیتروژن باعث تخریب خاک و مشکلات زیست‌محیطی در طی زمان شد (Widowati, 2012). در حال حاضر استفاده از انواع کودهای دامی یا آلی در خاک برای افزایش حاصلخیزی خاک یک روش معمول است. یکی از خصوصیات مواد آلی، تجزیه‌ی کندتر آن‌ها در مقایسه با کودهای معدنی است و معمولاً کودهای دامی هر دو تا سه سال اعمال می‌شود که علاوه بر هزینه‌های بالا، تجزیه سریع و معدنی شدن موادآلی، تاثیر معنی‌داری نیز بر گرمایش جهانی دارد (Sika, 2012; Aslam *et al*., 2014). یک ایده جدید برای افزایش مواد آلی و ذخیره طولانی مدت کربن در خاک استفاده از بیوچار است.

۱- دانشجوی دکتری اگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۵- استادیار، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۶- استادیار، گروه شیمی فیزیک، موسسه پژوهشی صنایع غذایی خراسان رضوی
(*- نویسنده مسئول: Email: hamidasghari@gmail.com)
DOI: 10.22067/gsc.v17i1.63344

بیوچار یک ماده زیستی گرماکافت (پیرولیز) شده است. گرماکافت فرآیند سوختن مواد آلی در حضور اکسیژن کم یا شرایط بدون اکسیژن است که منجر به تشکیل زغال غنی از کربن می‌شود که بسیار مقاوم به تجزیه است (Azeem *et al*., 2016; Mukherjee *et al*., 2014). دوام بالا و مقاومت به تجزیه‌ی بیوچار مربوط به تغییر در ساختار شیمیایی سلولز، همی‌سلولز و لیگنین در دمای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است به‌طوری‌که بیوچار ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر مقاوم‌تر از سایر مواد آلی موجود در خاک است (Aslam *et al*., 2014; Azeem *et al*., 2016). توانایی بالای این ماده در جذب و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آبشویی آنها، جذب فلزات سمی و کودهای شیمیایی و کاهش آزادسازی گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود (Berek *et al*., 2011). بیوچار به‌دلیل منافذ زیاد و سطح ویژه بالا، زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم‌های خاکزی است و از خشکی و شکار شدن آنها توسط موجودات بزرگتر جلوگیری کرده و منابع سرشاری از مواد معدنی و کربنی را برای میکروارگانیسم ها فراهم می‌کند. با توجه به این که میکروارگانیسم‌ها از خدمات اکوسیستمی مهم در طبیعت هستند، می‌توانند با تاثیر بر ساختار بیولوژیکی خاک، چرخه‌ی عناصر غذایی، بهبود دانه‌بندی خاک و معدنی شدن کربن آلی بر رشد گیاه موثر باشند (Zhang *et al*., 2014; Aslam *et al*., 2016; Lehmann *et al*., 2011). به‌دلیل نقش بیوچار در پایداری اکوسیستم‌ها، آزمایش‌های گسترده‌ای در سال‌های اخیر در ارتباط با تاثیر بیوچار بر رشد گیاهان و حاصلخیزی خاک انجام شده است ولی اغلب این مطالعات بر روی گیاهان زراعی بوده و تحقیق در رابطه با تاثیر بیوچار بر گیاهان دارویی بسیار نادر است. گیاهان دارویی از ارزش و اهمیت خاصی در تأمین بهداشت و سلامت جوامع، هم به لحاظ درمان و هم پیشگیری از بیماری‌ها برخوردار بوده و هستند. تحقیقات سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد جمعیت جهان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه از گیاهان دارویی به‌منظور رفع نیازهای اولیه بهداشتی و درمانی خود بهره می‌گیرند (Choudhary and Singh Sekhon, 2011). از طرفی به‌دلیل عوارض جانبی داروهای شیمیایی، روز به روز به گیاهان دارویی و فراورده‌های آن بیشتر توجه می‌شود و اعتقاد عمومی درباره استفاده از آن‌ها پیوسته تقویت می‌گردد.

سیاه‌دانه با نام علمی *Nigella sativa* L. یک گیاه دارویی دو لپه، علفی و یکساله که متعلق به خانواده آلاله می‌باشد که به دو صورت وحشی و زراعی در ایران دیده می‌شود. سیاه‌دانه دارای زمینه‌ی تاریخی و مذهبی در بین اقوام و ملل است، به‌طوری که میلیون‌ها نفر در نواحی مدیترانه و شبه قاره‌ی هند روزانه از روغن دانه آن در پیشگیری طبیعی و یا درمان بیماری‌ها استفاده می‌کنند. این گیاه به‌عنوان ادویه و در درمان بیماری‌هایی مثل آسم، فشارخون، دیابت، التهاب، سرفه، برونشیت، سردرد، اگزما، تب، سرگیجه و آنفولانزا نیز مصرف دارد. دانه یا روغن سیاه‌دانه به‌عنوان داروی ضدنفخ، ادرارآور، شیرآور و ضدانگل استفاده می‌شود (Boskabady *et al*., 2007; Akhondian *et al*., 2007).

آب یکی از مهمترین عوامل محیطی در تولید گیاهان دارویی می‌باشد. به‌طوری‌که کمبود آب در جریان تولید گیاهان می‌تواند صدمات سنگینی به رشد و نمو و همچنین مواد موثره گیاهان دارویی وارد نماید. آب نه تنها به لحاظ اکولوژیکی بلکه به لحاظ فیزیولوژیکی نیز دارای اهمیت است زیرا در اکثر فرآیندهای داخلی گیاه دخالت داشته و تقریباً تمام فعالیت‌های متابولیکی سلول‌های گیاهی از جمله ساخت مواد موثره در گیاهان دارویی بستگی به وجود آب دارد. به‌نظر می‌رسد بیوچار با داشتن صفاتی مانند توانایی ویژه در جذب و نگهداری عناصر غذایی و ظرفیت نگهداری آب بالا بتواند جایگزین کودهای شیمیایی در گیاهان شده و مقاومت گیاه به تنش‌های خشکی را افزایش دهد (Haider, 2016). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های تلفیقی برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های کم‌آبی، خاک‌های فقیر یا شور همراه با حفظ عملکرد مطلوب مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی‌که تحقیقات اندکی در رابطه با تاثیر بیوچار بر تنش خشکی وجود دارد، از طرفی نتایج مربوط به مطالعات بیوچار بسته به نوع ماده‌ی اولیه، دمای گرماکافت و خاک منطقه‌ی مورد استفاده متفاوت می‌باشد (Teat, 2014) و با توجه به اهمیت گیاه سیاه‌دانه در صنایع داروسازی و غذایی، اطلاعاتی در زمینه اثر بیوچار بر این گیاه به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود ندارد. لذا تحقیق حاضر بر روی گیاه سیاه‌دانه در اراضی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۵- ۱۳۹۴ به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و ۱۸ تیمار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد (طول جغرافیایی ۵۹درجه و ۲۸دقیقه شرقی۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) به‌اجرا درآمد. زمین مورد نظر در سال قبل از اجرای این آزمایش به‌صورت آیش بود. قبل از انجام آزمایش، از خاک این زمین نمونه‌برداری تصادفی انجام شد که نتایج آنالیز آن در جدول ۱ آمده است. کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری در سه سطح شامل آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I_1)، آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی (I_2) و آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی (I_3) و کرت‌های فرعی فاکتوریل دو عامل بیوچار در سه سطح (بدون بیوچار (B_1)، ۱۰ تن در هکتار بیوچار (B_2) و ۲۰ تن در هکتار بیوچار (B_3)) و عامل کود

شیمیایی در دو سطح (بدون مصرف کود (F_1) و مصرف کود شیمیایی (F_2)) بود. میزان مصرف کودشیمیایی بر اساس آزمایش‌های خاک ۷۵کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل (P_2O_5)، ۱۰۰کیلوگرم در هکتار پتاسیم (K_2So_4) و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (اوره) بود.

مراحل آماده‌سازی زمین در دی ماه سال زراعی ۹۵- ۱۳۹۴ انجام گرفت. ابعاد کرت‌های آزمایش ۳×۲متر، فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر یک متر بود. بیوچار از ضایعات چوب درخت گردو تهیه شد (Mukome *et al*., 2012). برای این منظور از کوره‌ای که فضای آن کاملاً بسته بود، استفاده شد تا اکسیژن وارد کوره نشود. دمای کوره بین ۶۵۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود (Mukherjee, 2011). تجزیه شیمیایی بیوچار نیز از طریق آزمایش مشخص شد (جدول ۲). بیوچار و کود شیمیایی فسفر و پتاسیم قبل از کاشت با خاک تا عمق ۱۵ -۰ سانتی‌متری مخلوط شد (Pühringer, 2016). سیاه‌دانه در تاریخ نوزدهم فروردین‌ماه ۹۵-۱۳۹۴ به‌صورت دستی در عمق دو سانتی‌متری کشت شد. هر کرت شامل هشت ردیف به فاصله ۲۵ سانتی‌متر بود. گیاهچه‌های سیاه‌دانه در دو مرحله چهار و هشت برگی برای رسیدن به تراکم مورد نظر (۲۰۰ بوته در مترمربع) با فاصله روی ردیف دو سانتی‌متر تنک شدند. کود نیتروژن در دو مرحله بعد از تنک کردن بوته‌ها (مرحله ده برگی و قبل از شروع رشد زایشی) به کرت‌های مورد نظر اضافه شد. از وجین دستی برای کنترل علف‌های هرز استفاده شد. نیاز آبی گیاه تیمار شاهد با استفاده از میانگین بلند مدت داده‌های روزانه‌ی پارامترهای هواشناسی ثبت شده از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری گردید. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو (Khosroshahi, 2013) محاسبه شد. نیاز آبی گیاه سیاه‌دانه بر اساس حاصل‌ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی سیاه‌دانه (K_c) (Ghamarnia *et al*., 2014) توسط نرم‌افزار آبیاری کراپ وات که یک نرم‌افزار مناسب برای مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری است و به‌وسیله فائو ارائه شده است، تعیین شد. مقدار نیاز آبی برای تیمار شاهد ۷۴۲/۹ میلی‌متر برآورد شد. نیاز آبی سایر تیمارها (تیمارهای تنش آبی) بر اساس نیاز آبی تیمار شاهد و درصد تنش آبی (۷۰ و ۴۰ درصد) برآورد و توزیع شد. آبیاری به روش قطره‌ای و به‌صورت هفتگی انجام گرفت و برای اجرای مقدار آب تیمارهای آبیاری از کنتور حجمی استفاده شد. زمان اعمال تیمارهای آبیاری پس از توسعه کامل گیاه و قبل از شروع مرحله زایشی در تاریخ نهم خردادماه ۹۵-۱۳۹۴ بود. دلیل انتخاب این زمان برای اعمال تنش، افزایش نیاز آبی گیاه در این مرحله و همچنین سپری شدن دوره بارندگی بود. به این ترتیب حداکثر صرفه‌جویی در مصرف آب صورت گرفت. برداشت در تاریخ‌های ۴ و ۵ مرداد ماه ۹۵-۱۳۹۴ با زرد شدن برگ‌ها و فولیکول‌ها انجام شد.

هم‌زمان با عملیات برداشت، شاخص‌های مورد مطالعه در خاک شامل درصد نیتروژن کل خاک، درصد فسفر قابل دسترس، پتاسیم خاک و مقدار ماده آلی خاک تعیین شد. برای این منظور در سه نقطه از تمامی کرت‌های آزمایشی در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. هر سه نمونه با هم مخلوط و یک نمونه واحد تهیه و در کیسه پلاستیکی بسته‌بندی و به آزمایشگاه منتقل شد (Chaudhry *et al*., 2016). نمونه‌برداری برای کربن زیست‌توده میکروبی خاک جداگانه و در شرایطی که خاک مزرعه از نظر رطوبتی در حد ظرفیت زراعی بود، انجام گرفت. نمونه‌های برداشت شده در ظروف حاوی یخ قرار داده شد و سریعاً به آزمایشگاه منتقل و تا زمان آزمایش در دمای چهار درجه‌ی سانتی‌گراد نگه‌داری شد. میزان کربن زیست‌توده‌ی میکروبی به روش تدخین - انکوباسیون (Horwath and Paul, 1994) در ۱۰۰ گرم خاک تعیین شد و بر حسب میلی‌گرم کربن در ۱۰۰ گرم خاک گزارش گردید. سایر نمونه‌های خاک بعد از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری، نیتروژن کل با روش کجلدال (AOAC, 2000)، فسفر قابل دسترس خاک به روش اولسن و سامرز (Olsen and Sammers, 1982)، پتاسیم به روش استات آمونیوم (Klut, 1986) و کربن آلی به روش والکلی بلک (Nelson and Sommers, 1982) اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری کربن آلی، مقدار ماده آلی خاک از حاصل‌ضرب کربن آلی در عدد ۱/۷۲۴ به‌دست آمد (Baldock and Skjemstad, 1999). عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش با حذف ردیف‌های کناری و با برداشت ردیف‌های وسط در هر کرت تعیین شد. کارایی مصرف آب به صورت عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) به ازای میزان آب مصرفی (مترمکعب درهکتار) محاسبه گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

صفات مرتبط با خاک

درصد نیتروژن خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که بیوچار در سطح احتمال پنج درصد بر درصد نیتروژن خاک تاثیر مثبتی داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نیز بیانگر افزایش درصد نیتروژن خاک در تیمارهای ۲۰ و ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود. به‌طوری‌که میزان نیتروژن در این دو تیمار به‌ترتیب ۰/۰۸۹ و ۰/۰۸۰۵ درصد در مقایسه با ۰/۰۷۶ درصد در شاهد بود (جدول ۴). هیچ‌یک از اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه‌ی تیمارهای مورد مطالعه بر درصد نیتروژن خاک معنی‌دار نبود. گزارش‌های زیادی مبنی بر تاثیر بیوچار

بـر افـزایش درصـد نیتـروژن خـاک وجـود دارد (Nigussie *et al*., 2012; Njoku *et al*., 2016; Foster *et al*., 2016). دلیل افزایش درصد نیتروژن در تیمارهای حاوی بیوچار را می‌توان به توانایی بالای این ماده در نگهداری عناصر غذایی و جلـوگیری از آبشـویی نیتـروژن نسبت داد. همچنین وجود منافـذ زیـاد و سـطح ویـژه بـالا در بیوچـار موجب افزایش قـدرت تبـادل کـاتیونی و افـزایش عناصـر غـذایی در تیمارهای حاوی بیوچار می‌شود (Jemal and Abebe, 2016).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of the experimental soil

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($dS\ m^{-1}$)	درصداشباع خاک SP (%)	نیتروژن کل Total N (%)	کربن آلی OC (%)	پتاسیم K ($mg\ kg^{-1}$)	فسفرقابل دسترس Available P ($mg\ kg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC ($cmolc\ kg^{-1}$)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Soil texture
7.65	1.9	40.2	0.079	0.837	220	12	8.9	38	41	21	Loam

جدول ۲ – ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد استفاده

Table 2- Physicochemical properties of the biochar used for the experiment

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($\mu S\ cm^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	کربن Carbon	نیتروژن کل Total N	فسفر Available P	پتاسیم K	موادآلی فرار و رطوبت Volatile organic matter & moisture
		(%)					
9.7	200	0.27	45.44	1.27	0.01	0.21	46.95

درصد فسفر قابل دسترس در خاک

تاثیر بیوچار بر فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار نبود ولی آبیاری در سطح احتمال پنج درصد و کود شیمیایی در سطح احتمال ۱ درصـد بر درصد فسفر قابل دسترس خاک تاثیر معنی‌دار داشـتند (جـدول ۳). در یک تحقیق بیوچار بدون استفاده از کـود شـیمیایی باعـث کـاهش فسفر خاک شد، این امر به‌دلیل قلیـایی شـدن خـاک و جـذب فسـفر توسـط بیوچـار عنـوان شـد (Nelson *et al*., 2011). ولـی محققـان دیگری به افزایش فسفر قابل دسـترس در تیمارهـای حـاوی بیوچـار اشاره کردند و دلیل این افزایش را بهبود اسـیدیته خـاک و در نتیجـه کاهش فعالیت یون‌های آلومینیوم و آهن بیان کردند (Dume *et al*., 2016). عدم تاثیر بیوچار بر فسفر قابـل دسـترس در تحقیـق حاضـر احتمالاً به دلیل جذب سریع فسـفر توسـط گیـاه یـا تعـادل در فسـفر ورودی ناشـــی از کـــود شـــیمیایی بـــا معـــدنی شـــدن آن توســـط میکروارگانیسم‌های خاک است که این نتایج همسو بـا گـزارش‌هـای فوستر و همکاران (Foster *et al*., 2016) بود. اثرات متقابل آبیاری و بیوچـار و آبیـاری و کـود شـیمیایی نیـز معنـی‌دار بودنـد (جـدول ۳) به‌طوری‌که تیمار I_3B_1 (آبیاری ۴۰ درصد نیـاز آبـی+ بـدون مصـرف بیوچار) با داشتن ۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، بیشـترین فسـفر خـاک را دارا بود (جدول ۵). اثرات متقابل آبیاری، بیوچار و کـود شـیمیایی نیـز بیانگر تاثیر بیشتر تیمار $I_3B_1F_2$ (آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبـی + بدون بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بـر درصـد فسـفر خـاک بـود (جدول ۵). فوستر و همکاران (Foster *et al*., 2016) نیز فسفر قابـل دسترس بیشتری را در تیمارهای تحت تنش نسبت بـه تیمـار آبیـاری کامل مشاهده کردند.

پتاسیم خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشـان داد کـه بیوچـار بـر میـزان پتاسیم خاک در سطح احتمال یـک درصـد تـاثیر معنـی‌داری داشـت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد که با افزایش بیوچار از ۱۰ تا۲۰ تن در هکتـار، میـزان پتاسـیم خـاک از۱۴۸/۶ تـا ۱۷۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت (جدول ۴). اثـر متقابـل آبیـاری و بیوچار نیز معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار I_1B_3 (آبیـاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف ۲۰ تـن در هکتـار بیوچـار) بـه مقـدار۱۸۶/۷ میلـی‌گـرم در کیلـوگرم بـود (جـدول ۵). در آزمایشـات مختلف نیز به افزایش پتاسیم خاک با افزایش مقدار بیوچار اشاره شده است (Dume *et al*., 2016; Njoku *et al*., 2016). بیوچار به‌دلیـل تاثیر بر افزایش قدرت تبادل کاتیونی در افـزایش یـون‌هـای خـاک از جمله پتاسیم نقش دارد و باعث دسترسی بهتر گیـاه بـه ایـن عناصـر می‌شود به‌علاوه بیوچار به‌دلیل دارا بودن عناصر غذایی در افزایش این عناصر در خاک موثر است (Pühringer, 2016).

درصد ماده آلی خاک

بیوچار بر درصد مواد آلی خاک در سطح احتمال پنج درصـد تـاثیر معنی‌داری داشت ولی اثر سایر تیمارها بر ایـن صـفت معنـی‌دار نبـود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات ساده نشان داد کـه در اثـر افـزایش سطوح بیوچار، درصد ماده آلی خاک افـزایش یافـت بـه‌طـوری‌کـه در

تیمار ۱۰ تن در هکتار بیوچار، ماده آلی ۱/۳۹۲ درصد و در تیمار ۲۰ تن در هکتار بیوچار ۱/۵۵۸ درصد بود (جدول ۴). محققان دیگری نیز به افزایش میزان کربن آلی و ماده آلی خاک با افزودن بیوچار به خاک اشاره کرده‌اند (Dume *et al* ., 2016). افزایش میزان کربن آلی خاک با افزایش مصرف بیوچار به وجود درصد بالایی از کربن آلی در بیوچار مصرفی مربوط است. با توجه به این که میزان ماده آلی خاک یکی از مولفه‌های مهم حاصلخیزی خاک است، افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل کربن بالای آن می توانـد منبـع بسیار مناسبی برای جبران کمبود کربن و مواد آلی خاک و در نتیجه بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و نیز حفظ سلامت خاک باشد (Freddo, 2013).

کربن زیست‌توده میکروبی

کربن زیست‌توده میکروبی نشانگر حضور فعال میکروارگانیزم‌های مختلف و تجزیه مواد آلی در اکوسیستم‌ها است و در آزادسازی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک نقش به‌سزایی دارد. درتحقیق حاضر بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک در سطح احتمال ۵ درصد تاثیر معنی‌داری داشت و بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی ۳۸/۲۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم خاک مربوط به مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار بود (جدول‌های ۳ و ۴). در بین اثرات متقابل دوگانه، اثر متقابل آبیاری و بیوچار معنی‌دار بود و بیشترین کربن زیست‌توده میکروبی مربوط به تیمار I_1B_3 (آبیاری بر اساس۱۰۰ درصد نیاز آبی+ مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار) به‌میزان ۴۱/۵۴ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم خاک بود. اثرات متقابل آبیاری، بیوچار و کود شیمیایی نیز معنی‌دار بود و بیشترین تاثیر مربوط به تیمار $I_1B_3F_2$(آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بود (جدول ۵). تاثیر بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی به‌دلیل گزارش‌های متفاوت در مقالات هنوز ناشناخته است (Lehmann *et al*., 2011). این تفاوت‌ها در نتایج با نوع و مقادیر بیوچار مصرفی و نوع خاک مرتبط است. برخی از محققان به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی با افزایش مصرف بیوچار اشاره کردند (Demisie and Zhang, 2015) ولی محققان دیگری نیزکاهش کربن زیست‌توده میکروبی را در آزمایش‌های خود عنوان کردند (Dempster *et al*., 2010). تغییرات در کربن زیست‌توده میکروبی خاک با توانایی بیوچار در بهبود اسیدیته و آب خاک، دسترسی بهتر به عناصر غذایی و جذب ترکیبات سمی مرتبط است به‌علاوه منافذ بیوچار می‌تواند از شکارشدن میکروارگانیسم‌ها جلوگیری کرده و به ذخیره‌ی کربن و عناصر معدنی کمک کند (Zhang, 2014).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای مورد مطالعه بر برخی خصوصیات خاک

Table 3- Analysis of variance (mean square) for the effect of studied treatments on some properties of experimental soil

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	نیتروژن کل Total nitrogen	فسفر قابل دسترس Available phosphorus	پتاسیم Potassium	مواد آلی خاک Soil organic matter	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon
بلوک Block	2	0.0051^{ns}	0.891^{ns}	3292.1^{ns}	1.518^{ns}	35.29^{ns}
آبیاری Irrigation (I)	2	0.0000^{ns}	8.25^{ns}	1357.4^{ns}	0.003^{ns}	38.76^{ns}
کرتهای اصلی خطای Main plot error	4	0.0003	2.3	435.8	0.108	30.95
بیوچار Biochar (B)	2	0.0007*	1.91^{ns}	4317.1**	0.253*	49.74*
بیوچار × آبیاری Irrigation×Biochar	4	0.0001^{ns}	25.44**	1762.9*	0.052^{ns}	67.74*
کودشیمیایی Fertilizer (F)	1	0.0003^{ns}	78.48**	185.1^{ns}	0.123^{ns}	67.84^{ns}
آبیاری× کودشیمیایی Irrigation× Fertilizer	2	0.0001^{ns}	8.76*	179.6^{ns}	0.067^{ns}	14.7^{ns}
بیوچار ×کودشیمیایی Biochar× Fertilizer	2	0.00006^{ns}	4.43^{ns}	311.5^{ns}	0.021^{ns}	0.021^{ns}
آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی Irrigation×Biochar× Fertilizer	4	0.00036^{ns}	14.37**	918.5^{ns}	0.128^{ns}	124.7**
خطای کرت های فرعی Sub plot error	30	0.0002	2.08	685.7	0.065	18.92
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	19.2	10.4	16.9	17.9	11.8

ns، ** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪

ns, ** and *are significant at p<0.01 and p<0.05, respectively

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات ساده بیوچار بر خصوصیات خاک
Table 4- Means comparison for biochar effects on soil properties

فاکتور Factor	سطوح Levels	نیتروژن کل Total Nitrogen (٪)	پتاسیم Potassium ($mg\ kg^{-1}$)	مواد آلی خاک Soil organic matter (%)	کربن زیست توده میکروبی Microbial biomass carbonic ($mgc100g\ soil^{-1}$)
بیوچار Biochar ($t\ ha^{-1}$)	0 (B_1)	0.076b	143.1b	1.329b	36.87ab
	10 (B_2)	0.085ab	148.6b	1.392ab	34.96b
	20 (B_3)	0.089a	172.2a	1.558a	38.28a

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In each column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range at $p<0.05$

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×بیوچار و اثرات سه‌گانه آبیاری × بیوچار × کودشیمیایی بر خصوصیات خاک
Table 5-Mean comparison of interaction effects for irrigation× biochar and irrigation× biochar × fertilizer on soil properties

تیمار Treatment	فسفر قابل دسترس Available phosphorus ($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم Potassium ($mg\ kg^{-1}$)	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbonic ($mgc100g\ soil^{-1}$)
I_1B_1	13.53c	148.3bcd	34.15cd
I_1B_2	15.5ab	156.7abc	35.62bcd
I_1B_3	14.17bc	186.7a	41.54a
I_2B_1	11.12d	119.2d	39.57ab
I_2B_2	12.7cd	144.2cd	38.25abc
I_2B_3	15.4ab	176.7ab	35.99bcd
I_3B_1	16a	161.7abc	36.89abc
I_3B_2	12.93c	145cd	31.03d
I_3B_3	12.97c	153.3bc	37.32abc
---------------	------	------------	-------
$I_1B_1F_1$	14.2 cdef		35.9bcdefg
$I_1B_1F_2$	12.8defg		32.3efgh
$I_1B_2F_1$	14.6cde		40abcd
$I_1B_2F_2$	16.4bc		31.1fgh
$I_1B_3F_1$	13.2 defg		37.1bcdefg
$I_1B_3F_2$	15.1cd		45.9a
$I_2B_1F_1$	10h		41.1abc
$I_2B_1F_2$	12.1fgh		37.9bcdef
$I_2B_2F_1$	11.7gh		37.5bcdefg
$I_2B_2F_2$	13.6defg		39abcde
$I_2B_3F_1$	12.6efg		41.6ab
$I_2B_3F_2$	18.2ab		30.35gh
$I_3B_1F_1$	12.2efgh		33defgh
$I_3B_1F_2$	19.7a		40.7abc
$I_3B_2F_1$	12.8defg		34.2cdefgh
$I_3B_2F_2$	13defg		27.7h
$I_3B_3F_1$	11.9fgh		39.7abcd
$I_3B_3F_2$	14cdefg		34.9bcdefgh

I_1, I_2 and I_3: 100, 70, 40% water requirement, respectively;
B_1, B_2, B_3: 0, 10, 20 t ha^{-1} biochar, respectively; F_1 and F_2: non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند

In a column of each experimental factor, same letters had no significant differences in Duncan's multiple range test at $p<0.05$

صفات مرتبط با گیاه

عملکرد دانه

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشانگر تاثیر معنی‌دار آبیاری بر عملکرد دانه بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثرات ساده بیانگر تفاوت معنی‌دار تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی با تیمار۱۰۰ و ۷۰ درصد نیاز آبی بر عملکرد دانه بود (جدول ۷). تنش آبیاری با تاثیر بر کاهش رشد رویشی و زایشی در گیاه، افت عملکرد را در پی دارد (Shabanzadeh *et al.*, 2011). در بین اثرات متقابل دوگانه، اثر متقابل کود و بیوچار بر عملکرد دانه معنی‌دار بود و بیشترین مقدار مربوط به تیمار B_3F_2 (۲۰تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و B_2F_2 (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب برابر ۱۲۲۷ و ۱۱۸۴ کیلوگرم در هکتار بود (جدول‌های ۶ و ۸). این نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار به‌همراه کود شیمیایی اثرات بهتری نسبت به مصرف هر یک از این دو ماده به‌تنهایی داشت. مطالعات مختلفی بیانگر تاثیر مضاعف بیوچار در ترکیب با کودهای آلی و معدنی بوده است که این امر با توانایی در جذب و نگهداری عناصر غذایی و در نتیجه دسترسی بهتر گیاه به عناصر غذایی مرتبط می‌باشد (Arif *et al.*, 2012; Chaudhry *et al.*, 2016; Gokila and Baskar, 2015). اثرات سه‌گانه کود، بیوچار و آبیاری بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۹). در بین اثرات متقابل سه‌گانه، تیمار $I_2B_2F_2$ (آبیاری بر اساس ۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و تیمار $I_2B_3F_2$ (آبیاری بر اساس۷۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب با مقدار ۱۳۵۶ و ۱۳۲۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشتند. بالا بودن عملکرد در این دو تیمار نشانگر تاثیر بیوچار در کاهش میزان آب مصرفی است. به‌این ترتیب می‌توان با استفاده از بیوچار به جای ۱۰۰ درصد آبیاری از۷۰ درصد آب مورد نیاز برای کشت سیاه‌دانه استفاده کرد. با کاربرد بیوچار به دلیل منافذ زیاد، سطح ویژه بالای آن، افزایش جذب عناصر غذایی و قدرت نگهداری آب بالا، موجبات عملکرد بیشتر گیاه فراهم گردید. به عبارت دیگر بیوچار در گیاهان تحت تنش ملایم، عملکرد دانه را به ازای مقدار آب مصرف شده بیشتر از تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد افزایش داد. در یک تحقیق، بیشترین تاثیر بر عملکرد دانه در لوبیای بالدار (*Vigna radiate*) در مصرف ۲۵ تن در هکتار بیوچار در مقایسه با مصرف ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوچار مشاهده گردید (Rub *et al.*, 2016). فوستر و همکاران (Foster *et al.*, 2016) در آزمایش‌های خود به کاهش عملکرد ذرت (*Zea mays*) در تیمار بیوچار به‌همراه تنش آب اشاره کردند درحالی که بیوچار در تیمار آبیاری کامل باعث افزایش عملکرد شد.

عملکرد کاه و کلش

اثر ساده تیمار کود شیمیایی، اثرمتقابل آبیاری و کود و اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری، کود و بیوچار بر عملکرد کاه و کلش معنی‌دار بود ولی اثر ساده آبیاری و بیوچار برعملکرد کاه و کلش تاثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۶). عدم تاثیر معنی‌دار بیوچار بر زیست‌توده گیاهی درآزمایش‌های دیگری نیز گزارش شده است (Schulz, *et al.*, 2014). بیشترین عملکرد کاه و کلش در اثر متقابل آبیاری و کود شیمیایی مربوط به تیمارهای I_2F_2 (۷۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) و I_1F_2 (۱۰۰ درصد نیاز آبی + مصرف کود شیمیایی) به‌ترتیب ۴۰۴۴ و ۳۷۲۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۸). اثرات متقابل سه تیمار نشان‌دهنده تاثیر بالاتر تیمارهای $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بر عملکرد کاه و کلش بود (۴۴۲۰ کیلوگرم بر هکتار) (جدول ۹). بنابراین می‌توان اظهار داشت که استفاده از کود شیمیایی و بیوچار به‌همراه آبیاری مناسب، باعث فراهم شدن آب و مواد غذایی و درنتیجه رشد بهینه گیاه گردیده است. ابراهیم و همکاران (Ibrahim, *et al.*, 2015) به افزایش بیشتر عملکرد کاه و کلش در تیمارهای حاوی بیوچار و آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمارهای بدون بیوچار و ۱۰۰ درصد آبیاری اشاره کردند. در آزمایشی بر روی گیاه ذرت بالاترین عملکرد کاه و کلش در تیمار بیوچار به‌همراه کود شیمیایی مشاهده شد. استفاده همزمان بیوچار با کود شیمیایی باعث جذب نیتروژن توسط بیوچار و آزادسازی آهسته آن شده و ارتباط بین منبع و مخزن تقویت می‌شود که نتیجه آن افزایش رشد رویشی و زایشی گیاه است. در مقابل کاربرد نیتروژن معدنی به تنهایی، به‌دلیل آبشویی آن به‌طور سریع‌تری از دسترس گیاه خارج می‌شود (Gokila and Baskar, 2015).

کارایی مصرف آب (بر اساس عملکرد دانه)

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده تیمارها تاثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب نداشت ولی اثر متقابل بیوچار و کود شیمیایی و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری، بیوچار و کود معنی‌دار بود (جدول۶). در بین تیمارهای مربوط به اثرات متقابل بیوچار و کود، تیمار B_3F_2 (۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و B_2F_2 (۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) نیز بیشترین مقدار کارایی مصرف آب را داشتند (جدول ۸). مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نشان داد که تیمارهای $I_3B_3F_2$ (۴۰ درصد نیاز آبی + ۲۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) و $I_2B_2F_2$ (۷۰ درصد نیاز آبی + ۱۰ تن در هکتار بیوچار + مصرف کود شیمیایی) بیشترین کارایی مصرف آب را داشتند (به‌ترتیب۰/۲۸۴ و ۰/۲۷۲کیلوگرم در متر مکعب) (جدول ۹). افزایش کارایی مصرف آب با بالا بودن عملکرد و

همچنین کاهش میـزان آب مصـرفی در ایـن تیمارهـا مـرتبط اسـت. افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد بیوچار در آزمایش‌های دیگـر نیـز گزارش شده است. اختر و همکاران (Akhtar *et al.*, 2014) گـزارش کردند که در گیاه گوجه‌فرنگـی (*Solanum lycopersicum*) کـاربرد بیوچار باعث مقاومت این گیـاه بـه تـنش خشـکی گردیـد و عملکـرد گیاهان تحت تنش تیمار شده با بیوچار به‌دلیل افزایش کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب در این تیمارهـا افـزایش یافـت. در تحقیقـی دیگر استفاده از مخلوط بیوچار و کمپوست بیشـترین افـزایش کـارایی مصرف آب و عملکرد را موجب شد (Abubakari *et al.*, 2015).

جدول ٦- تجزیه‌واریانس(میانگین مربعات) اثر تیمارهای مورد مطالعه بر عملکرد دانه، عملکردکاه و کلش و کارایی مصرف آب در گیاه سیاه‌دانه

Table 6- The analysis of variance (mean square) for the effect of studied treatments on seed yield, straw yield and water use efficiency in black seed

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کاه و کلش Straw yield	کارایی مصرف آب WUE
بلوک Block	2	338414.05 ns	4908604.05 ns	0.051 ns
آبیاری Irrigation (I)	2	678718.6 *	4387008.56 ns	0.002 ns
خطای کرت‌های اصلی Main plot error	4	66526.7	1136303.54	0.017
بیوچار Biochar (B)	2	18891.2 ns	124676.87 ns	0.001 ns
آبیاری× بیوچار Irrigation×Biochar	4	30726.2 ns	238939.54 ns	0.002 ns
کودشیمیایی Fertilizer (F)	1	101375.7 ns	16534020.6**	0.004 ns
آبیاری× کودشیمیایی Irrigation× Fertilizer	2	41023.2 ns	675786.42*	0.001 ns
بیوچار ×کودشیمیایی Biochar× Fertilizer	2	168023.7**	20575.56 ns	0.008**
آبیاری×بیوچار ×کودشیمیایی Irrigation×Biochar× Fertilizer	4	79246.9*	620880.02*	0.005**
خطای کرت های فرعی Sub plot error	30	26548.1	246939.3	0.001
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	15.0	16.7	15.1

ns، ** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪

ns, ** and * are significant at $p<0.01$ and $p<0.05$, respectively

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر ساده تیمار آبیاری بر عملکرد دانه در گیاه سیاه‌دانه

Table 7- Means comparison for the effect irrigation on seed yield in black seed

فاکتور Factor	سطوح Levels	عملکرد دانه Seed yield (kg ha^{-1})
آبیاری Irrigation (I) (%)	100 (I_1)	1239.3a
	70 (I_2)	1157.9a
	40 (I_3)	814.2b

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In a column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan's multiple range test at $p<0.05$.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه آبیاری×کودشیمیایی و بیوچار×کودشیمیایی بر عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و کارایی مصرف آب درگیاه سیاه‌دانه

Table 8- Mean comparison of interaction effects for irrigation× fertilizer and biochar× fertilizer on yield, straw yield and water use efficiency in black seed

فاکتور Factor	عملکرد دانه Seed yield (kg ha^{-1})	عملکردکاه و کلش Straw yield (kg ha^{-1})	کارایی مصرف آب WUE(kg m^{-3})
I_1F_1		2747b	
I_1F_2		3725a	
I_2F_1		2502b	
I_2F_2		4044a	
I_3F_1		2000c	
I_3F_2		2800b	
-----------	------------	------------	-------------
B_1F_1	1117abc		0.233abc
B_1F_2	986.3c		0.203c
B_2F_1	1033bc		0.213bc
B_2F_2	1184ab		0.243ab
B_3F_1	987.4c		0.203c
B_3F_2	1227a		0.253a

I_1, I_2 and I_3: 100, 70, 40% water requirement, respectively; B_1, B_2, B_3: 0, 10, 20 t ha-1 biochar, respectively; F_1 and F_2: Non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون و فاکتور، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In a column of each experimental factor, same letters had not significant differences in Duncan’s multiple range test at p<0.05.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه آبیاری،کودشیمیایی و بیوچار بر عملکرددانه، عملکردکاه و کلش و کارایی مصرف آب درگیاه سیاه‌دانه

Table 9- Mean comparison of interaction effects for irrigation x fertilizer x biochar on yield, straw yield and water use efficiency

فاکتور Factor	عملکرددانه Seed yield (kg ha^{-1})	عملکردکاه و کلش Straw yield (kg ha^{-1})	کارایی مصرف آب WUE (kg m^{-3})
$I_1B_1F_1$	1278ab	2747efgh	0.239abcd
$I_1B_1F_2$	1289ab	3327bcde	0.246abcd
$I_1B_2F_1$	1140abcdef	2773efgh	0.207de
$I_1B_2F_2$	1314ab	3874abc	0.24abcd
$I_1B_3F_1$	1232abc	2720efghi	0.234abcd
$I_1B_3F_2$	1182abcd	3973ab	0.213cde
$I_2B_1F_1$	1131abcdef	2400fghi	0.228bcd
$I_2B_1F_2$	1087abcdef	4053ab	0.218cde
$I_2B_2F_1$	1052bcdef	2273ghi	0.212cde
$I_2B_2F_2$	1356a	4420a	0.272ab
$I_2B_3F_1$	996.7cdefg	2833defgh	0.202de
$I_2B_3F_2$	1325a	3660abcd	0.262abc
$I_3B_1F_1$	941.2defg	1893i	0.23bcd
$I_3B_1F_2$	583.7h	3080cdefg	0.146f
$I_3B_2F_1$	906.3efg	2007hi	0.222bcde
$I_3B_2F_2$	880.7fg	2213hi	0.218cde
$I_3B_3F_1$	733.1gh	2100hi	0.173ef
$I_3B_3F_2$	1174abcde	3107cdef	0.284a

I_1, I_2 and I_3: 100, 70, 40% water requirement, respectively; B_1, B_2, B_3: 0, 10, 20 t ha-1 biochar, respectively; F_1 and F_2: non-using chemical fertilizer, using chemical fertilizer, respectively

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

In each column, same letters had not significant differences in Duncan’s multiple range test at p<0.05.

نتیجه‌گیری

بیوچار با تاثیر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بهبود اسیدیته خاک، بهبود عناصر غذایی خاک، افزایش قدرت نگهداری عناصر غذایی و ایجاد شرایط مناسب برای میکروارگانیسم‌های خاک می‌تواند بر رشد رویشی و زایشی سیاه‌دانه تاثیر مثبت داشته باشد. اگرچه تاثیر مصرف ۲۰ تن در هکتار بیوچار بر خصوصیات خاک بیشتر از ۱۰ تن در هکتار بیوچار بود ولی تفاوت معنی‌داری بر صفات مرتبط با سیاه‌دانه بین این دو تیمار مشاهده نشد. مصرف بیوچار به همراه کود شیمیایی اثرات بهتری را برعملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش نسبت به مصرف بیوچار یا کود شیمیایی به تنهایی داشت. این امر به منافذ و سطح ویژه بیشتر در بیوچار نسبت داده می‌شود که از هدررفت و آبشویی نیترات جلوگیری کرده و به دستیابی بهتر گیاه برای عناصر غذایی کمک می‌کند. بیوچار در شرایط کم‌آبیاری به‌دلیل داشتن منافذ زیاد و توانایی نگهداری آب بالا، باعث افزایش کارایی مصرف آب در گیاه شد. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک میزان آب مصرفی را کاهش داده و به ازای آب مصرفی، عملکرد بیشتر از گیاهان تحت تنش بدون بیوچار افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش نشان داد که با مصرف بیوچار می‌توان به جای آبیاری ۱۰۰درصد از ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه برای حصول همان میزان عملکرد استفاده کرده به‌این ترتیب می‌توان در میزان آب مصرفی صرفه‌جویی کرد.

References

1. Abubakari, A. H., Bayor, H., Takyi, I., Chimsah, F. A., Nyarko, G., Atuah, L., and Banful, B. 2016. Effect of compost-biochar mixes and irrigation on the growth and yield of Amaranthus (*Amaranthus hybridus*) under two growing temperatures. African Journal of Agricultural Research 11 (25): 2257-2265.
2. Akhondian, J., Parsa, A., and Rakhshandeh, H. 2007. The effect of *Nigella sativa* (black cumin seed) on intractable pediatric seizures. Medical of Science Monit 13: 555-559.
3. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., and Liu, F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. Agriculture of Water Management 138: 37-44.
4. Arif, M., Asad, A., Umair, M., Munsif, F., Kawsar, A., Inamullah, M., Saleem, M., and Gohar, A. 2012. Effect of biochar, FYM and mineral nitrogen alone and in combination on yield components of maize. Sarhad Journal of Agriculture 28 (2): 191-195.
5. Aslam, Z., Khalid, M., and Aon, M. 2014. Impact of biochar on soil physical properties. Scholarly Journal of Agricultural Science 4 (5): 280-284.
6. A.O.A.C. 2000. Association of Official Agricultural Chemists, Official and Tentative Methods of Analysis, 2nd ed., Washington, DC, USA.
7. Azeem, M., Hayat, R., Hussain, Q., Ahmed, M., Imran, M., and Crowley, D. 2016. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass, abundance, and enzyme activity in the mash bean field. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences 8: 1-13.
8. Baldock, J. A., and Skjemstad, J. O. 1999. Soil Organic Carbon/Soil Organic Matter. CSIRO Publishing, Melbourne.
9. Berek, A. K., Hue, N., and Ahmad, A. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. The Food Provider. Available at Website http:// www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar.
10. Boskabady, M. H., Javan, H., Sajady, M. and Rakhshandeh H. 2007. The possible prophylactic effect of *Nigella sativa* seed extract in asthmatic patients. Fundamental and Clinical Pharmacology 21: 559-566.
11. Choudhary, N., and Singh Sekhon, B. 2011. An overview of advances in the standardization of herbal drugs. Journal of Pharmacy Education Research 2 (2): 55-70.
12. Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash Abdul Saboor, M. N., Yaqoob, S., Salim, M., and Khalid, M. 2016. Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). Peer Journal Pre Prints. Available at Web site https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1.
13. Demisie, W., and Zhang, M. 2015. Effect of biochar application on microbial biomass and enzymatic activities in degraded red soil. African Journal of Agricultural Research 10: 755-766.
14. Dempster, D. N., Gleeson, D., B., Solaiman, Z. M., Jones, D. L., and Murphy, D. V. 2010. Biochar addition to soil changed microbial community structure and decreased microbial biomass carbon and net inorganic nitrogen mineralized. In 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia.
15. Dume, B., Mosissa, T., and Nebiyu, A. 2016. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in South West Ethiopia. African Journal of Environmental Science and Technology 10:77-85.
16. Foster, E. J., Neil Hansenc, B., Matt Wallenstein, B. D., and Cotrufoa, F. 2016. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system. Agriculture, Ecosystems and Environment 233:404-414.

17. Freddo, A. 2013. Biochar: for better or for worse? Ph.D. dissertation, University of East Anglia School of Environmental Science.
18. Ghamarnia, H., Miri, E., and Ghobadei, M. 2014. Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate. Irrigation Science 32 (1):67-76.
19. Gokila, B., and Baskar, K. 2015. Influence of biochar as soil amendment on yield and quality of maize. International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences 5:152-155.
20. Haider, G. 2016. Biochar as a Beneficial Soil Amendment in Sandy Soils. Ph.D. thesis. Department of Plant Ecology, Faculty of Biology and Chemistry Justus-Liebig-University Giessen, Germany.
21. Horwath, W. R., and Paul, E. A. 1994. Microbial biomass. In: DR Buxton (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties. ASA and SSSA. Madison, WI.
22. Ibrahim, O. M., Bakry, A. B., El Kramany, M. F., and Elewa, T. A. 2015. Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. Global Journal of Advanced Research 2 (2): 411-418.
23. Jemal, K., and Abebe, A. 2016. Determination of bio-char rate for improved production of Lemmon grass. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research 4 (2): 149-157.
24. Khosroshahi, M., 2013. Estimating water requirement of *Prosopis juliflora* at different habitates of Persian Gulf - Aman Sea region of Iran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research 21 (2): 300-315.
25. .Klut, A. 1986. Method of Soil Analysis: Physical, Chemical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America. Madison, Wiscosin, USA, 432-449.
26. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. Soil Biology and Biochemistry 43: 1812-1836.
27. Mukherjee, A., Lal, R., and Zimmerman, A. R. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. Science of the Total Environment 487: 26-36.
28. Mukherjee, A. 2011. Physical and Chemical Properties of a Range of Laboratory-Produced Fresh and Aged Biochars. Doctoral Dissertation, Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida.
29. Mukome, F. N. D., Six, J., and Parikh, S. J. 2012. The effects of walnut shell and wood feedstock biochar amendments on greenhouse gas emissions from a fertile soil. Geoderma 200(201):90-98.
30. Nelson, N. O., Agudelo, S. C., Yuan, W., and Gan, J. 2011. Nitrogen and phosphorus availability in biochar-amended soils. Soil Science 176, 1. doi:http://dx.doi.org/ 10.1097/SS.0b013e3182171eac.
31. Nelson, B. W., and Sommers L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page A.L, Miller R.H and Keeney D.R (eds). Methods of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties. The American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. 539-577.
32. Nigussie, A., Endalkachew Kissi, E., Misganaw, M., and Ambaw, G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science 12 (3): 369-376.
33. Njoku, C., Uguru, B. N., and Chibuike, C. C. 2016. Use of biochar to improve selected soil chemical properties, carbon storage and maize yield in an Ultisol in Abakaliki Ebonyi State, Nigeria. International Journal of Environmental and Agriculture Research 2: 15-22.
34. Olsen, S. R. and Sammers, L. E. 1982. Phosphrous. In: Page A.L, Miller R. Hand Keeney D.R (eds). Methods of soil analysis part 2. Chemical and microbiological properties. The American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 403-427.
35. Pühringer, H. 2016. Effects of different biochar application rates on soil fertility and soil water retention in on-farm experiments on smallholder farms in Kenya. Master´s thesis, Independent Project in Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences.
36. Rab, A., Rabnawaz Khan, M., Ul Haq, S., Zahid, S., Asim, M., Afridi, M.Z., Arif, M., and Munsif, F. 2016. Impact of biochar on mungbean yield and yield components. Pure and Applied Biology 5(3): 632-640.
37. Schouten, S. 2010. Biochar for sustainable agricultural development. A critical review of biochar for carbon management and the improvement of agricultural production systems. Institute of Environmental Sciences, Leiden.
38. Schulz, H., Dunst, G., and Glaser, B. 2014. No effect level of co-composted biochar on plant growth and soil properties in a greenhouse experiment. Agronomy 4: 34-51.
39. Shabanzadeh, Sh., Ramroudi, M., and Galavi, M. 2011. Influence of micronutrients foliar application on seed yield and quality traits of black cumin in different irrigation regimes. Journal of Crop Production and Processing 1 (2):79-89.
40. Sika, M. P. 2012. Effect of biochar on chemistry, nutrient uptake and fertilizer mobility in sandy soil. Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree Master of Science in Agriculture. University of Stellenbosch. ISSN 1818-6769.

41. Teat, L. 2014. Yield and physiological responses of the bioenergy crop miscanthus × giganteus to fertilizer, biochar and drought. Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Graduate School at Appalachian State University.
42. Widowati, W. H. 2012. The effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of Maize (*Zea mays*) in green house experiment. Journal of Agricultural Science 4 (5): 256-262.
43. Zhang, H. 2014. Biochar Effects on Soil Microbial Biomass and Activity. Ph.D. dissertation, The University of Guelph, Canada.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 17, No. 1, Spring. 2019, p. 39-52

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، ص. ۵۲-۳۹

Effects of Biochar on Soil Fertility and Water Use Efficiency of Black Seed (*Nigella sativa* L.) under Water Stress Conditions

F. Abbaspour[1], H. R. Asghari[2*], P. Rezvani Moghaddam[3], H. Abbasdokht[4], J. Shabahang[5], A. Baig Babaei[6]

Received: 18-03-2017
Accepted: 07-04-2018

Introduction: Application of chemical fertilizers since green revolution, make the crop production doubled or even tripled in some crops. However, long-term overuse of these fertilizers decreased soil quality. Thus to obtain the same yield, the rate of inorganic fertilizer application steadily increases from year to year. Recent studies revealed that in order to increase the chemical fertilizer efficiency, it needed to integrate organic resources with chemical fertilizers to soil. However, using organic manure in the soil will be decomposed very rapidly. Biochar is a source of high organic carbon which highly resistant to decomposition. It has a porous quality and large surface area which reduces leaching of nutrients. Biochar addition to soils can change microbial biomass, adsorb toxic compounds and improved soil water and pH status. The internal porosity of biochars may help soil microorganisms avoid grazers. Globally demands for plant- based medicines are growing. Black seed (*Nigella sativa* L.) is annual plant to Ranunculaceae family, is grown in arid and semi-arid regions of the world. Black seed considered as a spice, medicinal plant and used as seasoning in cooking and foodstuffs. Recently, there has been an increasing interest in integrated approaches in improving crop production to resist conditions of nutrient-poor soil, drought, and salinization. Since, a few attempt has been made to investigate the effects of biochar amendment on medicinal plants in semi-arid agricultural systems, the present study was initiated in agro ecological condition of Mashhad.

Materials and Methods: A field experiment was conducted as split plots factorial layout based on a randomized complete block design with three factors and three replications at the Research Station, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran during growing season of 2016. Three levels of irrigation (100, 70, and 40 percent of water irrigation requirement) were assigned as main plots and the combination of three levels of biochar (0, 10, and 20 ton ha^{-1}) and two levels of chemical fertilizers (without and with chemical fertilizer) were allocated as sub plots. Recommended dose for nitrogen, phosphorus, and potassium was 150 kg ha^{-1}, 75 kg ha^{-1} and 100 kg ha^{-1}, respectively. The size of each experimental unit was 3×2 m^2. Black seed thinning was performed after emergence to get a plant population density of 200 plants m^{-2}. Post experimental soil which was amended with biochar and fertilizer were analyzed for total nitrogen, available phosphorus, potassium, soil organic matter, and microbial biomass carbon. Plant criteria which studied were such as grain yield (kg ha^{-1}), straw yield (kg.ha^{-1}) and water use efficiency (base of grain yield). Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan multiple range test were used to compare the recoded data.

Results and Discussion: Soil N, K, SOM, and Microbial biomass carbon were significantly affected by biochar application. Phosphorus was not affected by biochar. The highest biochar effect on soil characteristics was found under 20 ton ha^{-1} biochar application treatment. The results showed that application of 10 and 20 ton ha^{-1} of biochar improved soil nitrogen compared with control treatment. Soil organic matter was increased by 1.56% compared with 1.33% in control when 20 ton ha^{-1} biochar was used. It has been reported that the biochar may increase the organic matter of the poor soils. The soil microbial biomass carbon was increased by biochar and fertilizer application. It seems that the reason for increasing soil microbial biomass by adding biochar to the soil is enhancing available soil nutrients, adsorption of toxic compounds and improved soil water and pH status. The internal porosity of biochars may help soil microorganisms avoid grazers. Combine use of fertilizer and

1- Ph.D. student of Agro ecology, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology
2- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology
3- Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology
5- Assistant professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
6- Assistant professor, Research Institute of Food Science and Technology
(*- Corresponding Author Email: hamidasghari@gmail.com)

biochar were more affected on plants growth than biochar or fertilizer alone. The interaction between biochar, chemical fertilizer and water requirements significantly affected the seed and straw yield. The significant increase of grain yield, straw yield observed in $I_2B_2F_2$ (70% water requirement+10 ton ha^{-1} biochar+ with chemical fertilizer) and $I_2B_3F_2$ (70% water requirement+20 t.ha^{-1} biochar+ with chemical fertilizer) treatments. Biochar significantly increased water use efficiency which shows that under water deficiency, biochar can increase the uptake of water and nutrients. As a result, plants tolerance against water deficiency increase and more yields will be produced for a specific value of water. This means the water use efficiency can increase and the use of water will decrease.

Conclusions: This study confirmed that biochar application can help in increasing of black seed production through the improving some physical and chemical properties of the soil such as soil pH, soil nutrient availability, soil nutrient holding capacity, and soil microorganism conditions. Although the application of 20 ton ha^{-1} biochar improved soil properties compared with 10 ton ha^{-1}, the difference was not significant. Application of biochar with chemical fertilizers had better effects on seed and straw yield, compared with solely application of biochar and chemical fertilizers. It may belong to the biochar ability to decrease nitrate and other elements leaching due to its high porosity and high water retention capacity which increased water use efficiency in the plant. This is important in particular, in arid and semi-arid areas, where reduces the amount of water consumed and increases water yields for plants that are under water stress. The seed production of black seed was not affected by reducing water requirements up to 70 % of its total water requirements when biochar was applied. This means that, by using the biochar in soil, only 70% water irrigation required. These results may use for water saving in agriculture in arid and semi-arid conditions.

Keywords: Chemical fertilizer, Seed yield, Soil microbial biomass carbon, Soil organic matter